PITEAU ASSOCIATES
Geotechnical and Water Management Consultants

25 Rudd Road, Illovo, Johannesburg
Gauteng, South Africa 2196
TEL: +011.271.0900.2283
www.piteau.com

ARCHIVO: 4099TM07v1

MEMORANDO TECNICO

FECHA: 6 de abril, 2022

PARA: Alejandro Chambi, SuperIntendente de Ambiente - Minera Panama S.A.

DE: Martin Williams
mwilliams@piteau.com

RE: **Requisitos de Rehabilitación para la roca estéril de Cobre Panamá.**

1. INTRODUCCION

Este memorando técnico ha sido preparado por Piteau Associates (Piteau) como contribución a un amplio programa de trabajo comisionado por los Departamentos de Mineria y Ambiente de Minera Panamá S.A. (MPSA) con el fin de proporcionar orientación en el desarrollo de procedimientos de control ambiental basados en riesgo, para la operación, el cierre y la rehabilitación de todos los vertederos de roca estéril (WRD) en Cobre Panamá. Durante la próxima década, el WRD de Botija Sur existente se complementará con los WRD en los sectores de Colina y Valle Grande del sitio de Cobre Panama. La caracterización geoquímica de la roca estéril que se reportará a cada uno de los WRD (Piteau, 2017, 2021) ha confirmado que la mayor parte de la roca será potencialmente formadora de ácido (PAF). Las simulaciones de la calidad del agua realizadas mediante un modelo probabilístico de balance de agua y balance de masas químicas en todo el emplazamiento, desarrollado por primera vez por Piteau en 2017, indican que, en ausencia de medidas de control adecuadas, de los WRDs emanaría agua de contacto de bajo pH con cargas significativas de SO4 y metales, tanto durante las operaciones activas como tras el cierre

Durante el período 2017 a 2022, MPSA ha implementado varias intervenciones para minimizar los impactos en la calidad del agua asociados con los WRDs de Cobre Panamá. Éstas incluyen el aislamiento de la saproca, que constituye el componente más "reactivo" desde el punto de vista geoquímico de los flujos de roca estéril, mediante su eliminación en celdas revestidas de saproca. También se ha hecho un esfuerzo para optimizar el diseño de los WRDs de manera que se maximice la escorrentía superficial y se impida la infiltración.

La rehabilitación de los WRDs al mismo tiempo que las operaciones activas (cuando sea factible) y en el cierre final es tanto un compromiso legal en los permisos ambientales de MPSA como un elemento central de la estrategia más amplia de protección de la calidad del agua para el sitio. El Plan de Gestión Ambiental (PGA) de MPSA, formulado junto con el EIAS del proyecto (2012), incluye un enfoque genérico para la rehabilitación de los WRDs que implica la colocación de 3 m de saprolita geoquímicamente benigna en todas las superficies de los vertederos finales, con la posterior revegetación. Sin embargo, esta especificación de cobertura no se seleccionó sobre la base de ningún análisis de rendimiento experimental o basado en modelos de alternativas. Por lo tanto, puede considerarse como una estrategia provisional, que se perfeccionará mediante la realización de estudios de diseño apropiados para la industria.

Este memorando describe la metodología y los resultados de la modelización del flujo no saturado realizada por Piteau en 2021 con la intención específica de evaluar los méritos de los espesores de cobertura alternativos para los WRDs de Cobre Panamá. La evaluación se llevó a cabo para proporcionar orientación con respecto al enfoque de rehabilitación más apropiado que se aplicará tanto para la rehabilitación concurrente de las áreas de los vertederos operativos que ya no estarán sujetos a la colocación de roca estéril como para la rehabilitación final. La optimización de los diseños de cobertura utilizando modelos de flujo no saturado como herramienta de apoyo a la toma de decisiones se ha convertido en algo común en la industria minera a nivel mundial y tiene como objetivo garantizar que se haga el mejor uso posible del material inerte o de baja reactividad almacenado durante la explotación minera para su uso sobre una base de prioridad de riesgo en la rehabilitación de todo el sitio.

2. CRITERIO DE DISEÑO PARA LOS VERTEDEROS DE DISEÑO ESTERIL

Los lineamientos generales de diseño y construcción de las escombreras de Cobre Panamá se establecieron por primera vez en el momento de la preparación del EsIA (2012). Posteriormente se han perfeccionado sobre la base de los estudios realizados por Call & Nicholas Inc. (CNI, 2015) y el equipo corporativo de planificación minera de MPSA. Para el diseño de todos los WRD es fundamental mantener un factor de seguridad estático (FOS) de >1,3 y un FOS pseudo estático de >1,0. Los parámetros de diseño necesarios para alcanzar estos criterios de FOS se basan en todos los casos en el 30% del evento máximo creíble (MCE). Esto equivale a 0,072 g. Para cumplir con los criterios de estabilidad de los WRDs especificados, CNI (2015) propuso la construcción de los WRDs en alturas de elevación en no más de 30 m. Esto también tenía la intención de evitar la erosión excesiva. Las especificaciones de los ángulos y anchos de las caras de los bancos se definieron en el rango de 32 a 38o, con anchos de bancos a lo largo de las alineaciones de los caminos de acarreo establecidos en 26 a 38 m. Tras la inclusión de todas estas variables en los diseños provisionales de los WRD, CNI (2015) realizó análisis de estabilidad para optimizar interactivamente cada forma de terreno de las instalaciones. En general, se llegó a la conclusión de que se requerían modestos ángulos entre rampas de 27 a 33 grados en todos los WRD.

Durante el período de operaciones desde 2017, los criterios de diseño de los WRD se han modificado en casos específicos sobre la base tanto de las limitaciones prácticas como del rendimiento observado. Los criterios existentes para los WRD se resumen en el cuadro 1.

Cuadro 1: Criterio de diseño del WRD de Cobre Panama.

Parametro	Valor	Observación
Superficie Final		
Angulo de la Cara de la Pendiente	1:2.5	Criterio seleccionado para establecer un equilibrio defendible entre la optimización de la capacidad de almacenamiento y el control de la estabilidad/erosión
Altura de elevación	40 m	Las especificaciones de la altura de elevación tienen por objeto garantizar que la energía erosiva pueda controlarse dentro de límites aceptables en los taludes entre ascenso y que la rehabilitación progresiva pueda llevarse a cabo eficazmente.
Ancho de la Berma	8 m	Las anchuras de las bermas de 8 m son adecuadas, ya que permiten la anchura necesaria de 5 m para el equipo de hidrosiembra de MPSA, más una anchura de 3 m que representa el mínimo requerido para la construcción de canales de drenaje.
Espesor de la Cubierta de Saprolita	3 m	El compromiso #13251 en el EIAS de Cobre Panamá especifica un espesor de cubierta de 3 m. Esto queda pendiente de optimización basado en el análisis formal de rendimiento de los diseños alternativos.
Ancho de la Rampa	45 m	
Radio interior de la Curva de la Rampa	250 m	Definido por Piteau en conjunto con MPSA como el mínimo radio de giro operacionalmente factible.
Anchura de la Rampa de Drenaje	15 m	Definido para permitir un canal de agua, 740 de tráfico y una berma de seguridad.
Inclinación de la Rampa de Drenaje	<20%	Inclinación máxima observada sin derramar material del cuerpo del vertedero.
Angulo de la Cara de la Pendiente	37°	
Parámetros Operacionales		
Altura de Elevación – Saprolita & Saproca	10 m	
Altura de Elevación – Residuos Frescos	10 a 20 m	
Ancho de la Berma – Saprolita	15 m	10 m altura de elevación
Ancho de la Berma – Residuos Frescos	27 m	20 m altura de elevación

La tabla 1 indica que actualmente se adopta un ángulo de cara al talud de 1:2,5. Esto se ha revisado en relación con las especificaciones del CNI (2015) para mejorar la eficiencia del almacenamiento de rocas, manteniendo al mismo tiempo un control razonable de la erosión y del riesgo de fallo superficial. Para la rehabilitación, la directriz de cobertura de saprolita de 3 m, que constituye el centro del presente memorando, está sujeta a la importante limitación de que el volumen de saprolita inerte que se generará dentro del balance de materiales operativo probablemente sea insuficiente para la colocación sistemática de un espesor de 3 m en todos los WRD.

3. OPTIMIZACION DE LOS PROTOCOLOS DE REHABILITACION DE LOS WRD

3.1 Objetivos

Los objetivos fundamentales de la rehabilitación progresiva y final de los WRD de Cobre Panamá son producir formas de terreno que sean físicamente estables (resistentes a la falla profunda y a la erosión) y que permitan el mínimo flujo de filtración posible desde la masa rocosa. MPSA reconoce que estos objetivos requieren la colocación de un material de baja permeabilidad y geoquímicamente no reactivo en las superficies de los vertederos como barrera de infiltración y medio de crecimiento. La saprolita constituye el único medio natural viable disponible localmente para este fin.

Para apoyar la selección de un diseño de cubierta que sea rentable y al mismo tiempo garantice un nivel aceptable de control de la infiltración, Piteau realizó en 2021 la modelización de una serie de configuraciones de cubierta alternativas utilizando el código de simulación de flujo no saturado SEEP/W. Los principales objetivos de este ejercicio fueron:

a) Estimar la infiltración que se produciría en condiciones no rehabilitadas con el fin de evaluar el rendimiento de las alternativas de cobertura.
b) Evaluar la efectividad de un medio de cobertura de saprolita natural colocado a diferentes espesores para la reducción de la infiltración neta y la consiguiente promoción de la escorrentía superficial. Se realizó una modelización para evaluar el rendimiento de las cubiertas de saprolita en espesores que van de 1 a 3 m. El límite superior de este rango corresponde a las especificaciones provisionales para la colocación de la cubierta final indicadas en el PEM de Cobre Panamá.

3.2 Metodología

La modelización numérica se realizó utilizando un formato de columna 1D. Las tasas de infiltración desde la base de la columna bajo cada escenario alternativo fueron modeladas como una función de las propiedades hidráulicas de la cubierta y/o de la masa rocosa subyacente y de la tasa de infiltración efectiva en la superficie de la columna. Las propiedades hidráulicas se calculan en el modelo en función de la granulometría y la saturación relativa.

Todas las simulaciones se realizaron utilizando el modelo numérico de flujo no saturado SEEP/W (GeoStudio 2020) que es un modelo de elementos finitos configurado para resolver las ecuaciones de Richards para el flujo en medios porosos con saturación variable. Se utilizaron las siguientes propiedades clave como entradas del modelo:

- Curvas de retención de humedad del suelo o de succión: que expresan la relación entre la presión de los poros y el contenido de agua de un material determinado, regida por la distribución granulométrica, el volumen de huecos y la succión de la matriz.
- Conductividad hidráulica (K): que se refiere a la capacidad del material para conducir el agua en condiciones de saturación variable. La máxima conductividad hidráulica de un suelo o roca se obtiene bajo saturación y disminuye de acuerdo con la curva de succión, a medida que el contenido de agua cae por debajo de la saturación.

Se utilizaron datos específicos del sitio para representar las propiedades hidráulicas del material competente actualmente depositado en el WRD. Las curvas características de contenido de agua (VWCC) se obtuvieron a partir del análisis granulométrico de muestras recogidas en el vertedero en julio de 2019 (Figura 1).

Para el medio de cubierta del saprolito los datos de distribución granulométrica reportados por AMEC (2010) fueron aplicados para la parametrización del modelo SEEP/W. Estos indican una composición de grano muy fino (arcilla poco plástica a arena limosa) con una alta humedad (del 35% en promedio). Las curvas de distribución granulométrica para la saprolita se muestran en la Figura 2.

Figura 1 Distribución granulométrica de la roca competente que se reporta a los WRD de Cobre Panamá.

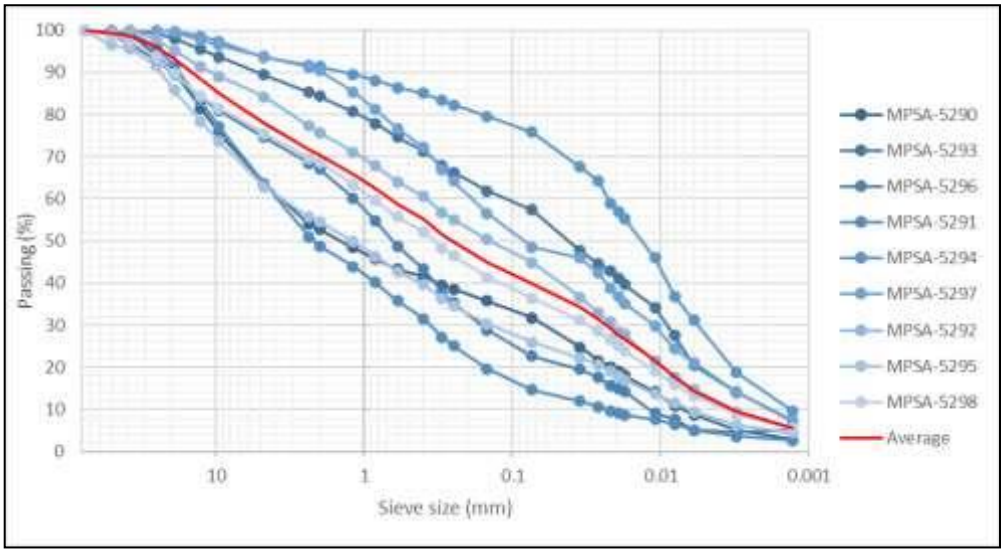
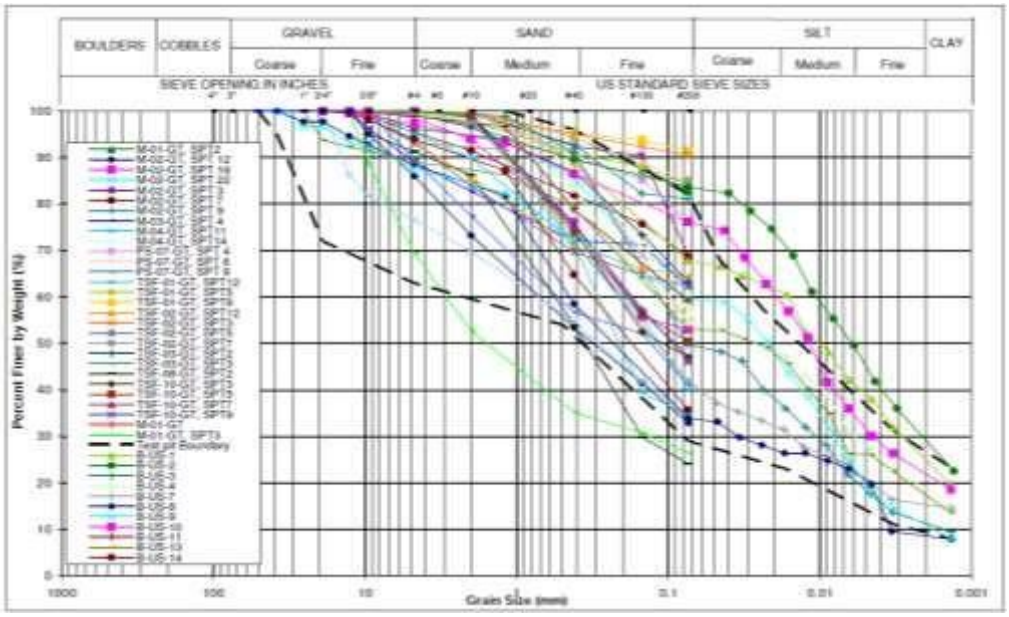


Figura 2 Distribución granulométrica para la saprolita de Cobre Panamá (AMEC, 2010)



Las propiedades hidraulicas asignadas en el modelo 1D se resumen como sigue:

- La roca estéril y el material de acopio se caracterizan por una baja capacidad de retención debido a una gran distribución granulométrica. El contenido volumétrico de agua saturada se asumió como equivalente al 35%. Se asignó a la roca estéril una conductividad hidráulica con un valor medio de 5x10-7 m/s.
- La saprolita se caracteriza por una mayor capacidad de retención debido a su alto contenido en arcilla limosa. El contenido volumétrico de agua saturada se supuso equivalente al 30%. La matriz de material fino produce una baja conductividad hidráulica vertical con un valor medio de 5x10-8 m/s asignado.

La condición de contorno en la parte superior de las columnas del modelo 1D se estableció como una Interfaz Tierra-Climatismo (LCI). En este límite se aplicaron los valores diarios de precipitación y evaporación de la Estación Meteorológica Automática (AWS) de Botija Laydown. Se disponía de datos específicos del lugar para el período de octubre de 2018 a 2020. La PAM a largo plazo se calculó en 4319 mm/año, mientras que la evaporación de la bandeja se estimó en 1409 mm/año. La tasa de evaporación real se calculó en cada paso de tiempo utilizando la relación propuesta por Wilson y

La filtración se simuló en la base de la columna del modelo utilizando una condición de contorno de gradiente unitario. Esta condición de contorno fue adaptada para la modelación de un sistema no saturado, permitiendo calcular el flujo de salida en cada paso de tiempo sin requerir la saturación de la columna. El modelo aplicó datos de entrada de precipitación y evapotranspiración potencial para un período de 10 años. Esto es una duración suficiente para minimizar el efecto de las condiciones iniciales y los eventos extremos que podrían influir fuertemente en la tasa de recarga simulada durante un corto período de evaluación.

3.3 Resultados

3.3.1 Caso no Rehabilitado

Los resultados de la modelización de la configuración del caso base coinciden con las observaciones de campo del WRD de Botija Sur existente, las cuales sugieren que las tasas de infiltración son altas y que las respuestas de infiltración a las precipitaciones de lluvia son relativamente rápidas. Para una superficie no rehabilitada, la tasa de infiltración total prevista para la huella del WRD corresponde a alrededor del 72 % de la precipitación incidente. En cada uno de los de los WRD de Botija, Colina and Valle Grande, esto significa un flujo de más de 200 L/s.

3.3.2 Alternativas de la cubierta de saprolita

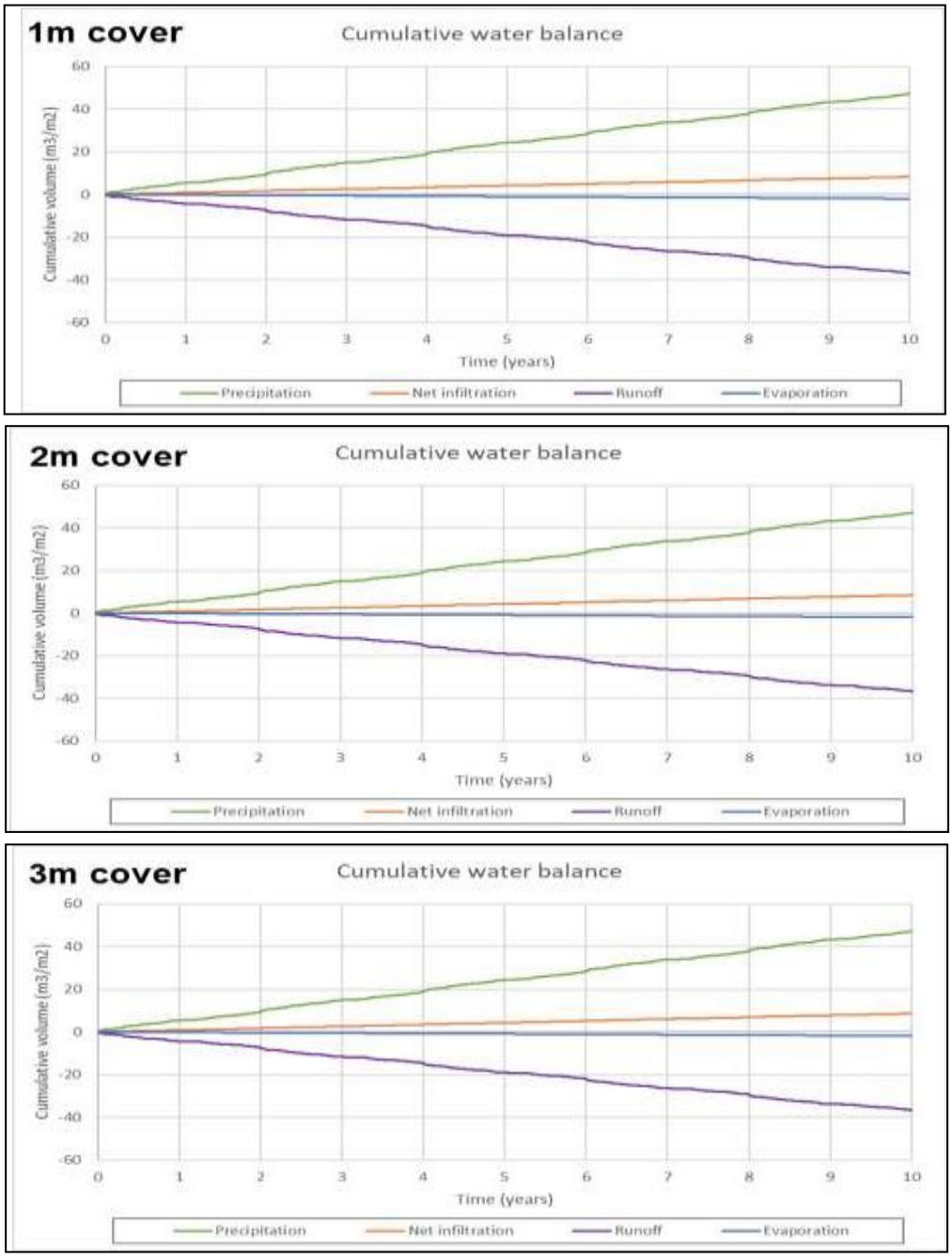
En todos los escenarios en los que se coloca una cubierta de saprolita sobre las superficies del WRD, la capacidad de infiltración se reduce hasta el punto de que se prevé que aproximadamente el 78% de la precipitación se desprenda como escorrentía superficial. La modelización de los efectos sobre la infiltración neta de los espesores variables de la cubierta de saprolita sugiere que se producen diferencias estrictamente limitadas de la tasa de infiltración a través de los rangos de espesor de 1 a 3 m. A un Ksat de 5,1 x 10^{-8} m/s se predice que la infiltración neta a través de la cubierta a espesores de 1, 2 y 3 m de saprolita es del 18% del PAM. Esto se reduce al 4% con un Ksat de saprolito de 1,1 x 10^{-8} m/s (ver Tabla 2).

Los resúmenes del balance hídrico de las simulaciones SEEP/W de cada una de las alternativas de cobertura de 1, 2 y 3 m de saprolita se presentan en la Figura 3. En base a estos resultados, se recomienda que para la rehabilitación progresiva de todos los WRD de Cobre Panama, una cubierta de 1 m de saprolita ofrece la mejor relación coste-beneficio de las alternativas consideradas.

Tabla 2: Resumen de la predicción de SEEP/W de infiltración neta para espesores de cubierta alternativos.

	(% MAP)		(l/s)			
	Net percolation	Runoff	Net percolation Stockpile	Net percolation Botija Dump	Runoff Stockpile	Runoff Botija Dump
1 Bare waste	72%	25%	84	137	29	48
2 1m - Saprolite cover (5.10x^{-8} m/s)	18%	78%	21	34	90	148
3 2m - Saprolite cover (5.10x^{-8} m/s)	18%	78%	21	34	90	148
4 3m - Saprolite cover (5.10x^{-8} m/s)	18%	78%	21	34	90	148
5 1m - Compacted saprolite cover (1.10x^{-8} m/s)	4%	93%	5	8	108	177
6 2m - Compacted saprolite cover (1.10x^{-8} m/s)	4%	93%	5	8	108	177
7 3m - Compacted saprolite cover (1.10x^{-8} m/s)	4%	93%	5	8	108	177

Figura 3: Balance hídrico superficial para los escenarios alternativos de la cubierta del DMA utilizando espesores de saprolita de 1m, 2m y 3m.



4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Este memorando ha sido preparado en nombre de MPSA para proporcionar orientación con respecto a la optimización de las medidas de rehabilitación para los WRDs actualmente en operación y/o a desarrollar en el futuro en Cobre Panamá. Las principales conclusiones de la evaluación realizada son las siguientes:

1) En ausencia de una intervención adecuada para la restricción de la infiltración en las superficies de los WRDs, podría existir un riesgo significativo de degradación de la calidad del agua, corriente abajo de las instalaciones.
2) La colocación de una cubierta en los WRDs será una necesidad, dada la alta proporción de lluvia incidente que se predice por el modelo de flujo no saturado del SEEP/W que se infiltrará en la masa rocosa y se descargará como filtración basal bajo una condición de WRD no rehabilitado.
3) La modelización de diseños alternativos de cubierta para los WRDs sugiere que una especificación de cubierta de saprolita de 1 m constituirá un protocolo pragmático para la rehabilitación de las instalaciones de residuos a lo largo de la vida de la mina. Esto debería aplicarse en lugar del grosor provisional de la cubierta de 3 m indicado en el EMP de MPSA.

5. LIMITANTES

Esta investigación se ha llevado a cabo utilizando un estándar de cuidado consistente con el que se espera de los profesionales científicos y de ingeniería que realizan trabajos similares en condiciones similares a nivel mundial. No se ofrece ninguna garantía expresa o implícita. Este memorándum se ha elaborado para uso exclusivo de MPSA. Cualquier uso, interpretación o confianza en esta información por parte de terceros, es bajo el riesgo exclusivo de dicha parte. Piteau Associates no acepta ninguna responsabilidad por el uso no autorizado

Presentado respetuosamente,

PITEAU ASSOCIATES SOUTH AFRICA LTD.

Martin Williams, BSc. PhD.
COO, Recurso Hídrico, Piteau Associates